Oddělení fyzikálních praktik při Kabinetu výuky obecné fyziky MFF UK

PRAKTIKUM II – Elektřina a magnetismus

Úloha č. XIV.

Název: Relaxační kmity

Pracoval: Radim Pechal stud. skup. F – 11 dne 14. října 2008

Odevzdal dne: ....

Hodnocení:.......................................

Připomínky:

Kapitola referátu	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Teoretická část	0 – 3	
Výsledky měření	0 – 9	
Diskuse výsledků	0 – 5	
Závěr	0 – 2	
Seznam použité literatury	0 – 1	
Celkem	max. 20	

Pracovní úkol

1. Proměřte voltampérovou charakteristiku diaku a z ní určete:
   1.1. spínací napětí při obou polaritách U_{BO1}, U_{BO2}
   1.2. pokles napětí na diaku při překročení spínacího napětí ΔU (při obou polaritách)
   1.3. tzv. symetrii diaku $|U_{BO1} - U_{BO2}|$.

Všechny určené hodnoty porovnejte s katalogovými.
2. Zapojte diak jako zdroj relaxačních kmitů a změřte závislost periody těchto kmitů T na časové konstantě $\tau = R \cdot C$ obvodu při konstantním napětí zdroje (cca 40 V). Kmitočet relaxačních kmitů měřte běžně čítačem, při několika řádově různých hodnotách však též přímo osciloskopem a porovnáním s kmitočtem generátoru (pomocí Lissajousových obrazců). V referátu porovnejte přesnost použitých metod měření kmitočtu.
3. Změřte závislost frekvence kmitů f na napětí zdroje U_O. Pomocí osciloskopu určete z amplitud relaxačních kmitů hodnoty zhášecího napětí U_{zh} a naměřené hodnoty ověřte výpočtem.

Teoretický úvod

Diak je třívrstvá spínací součástka, složená postupně z polovodičových vrstev P, N a P. Je to symetrická součástka, u která by teoreticky nemělo záviset na polaritě (v praxi je tomu však jinak – viz. dále). Diak se dá přirovnat k bipolárnímu tranzistoru PNP, který nemá vyvedenu bázi, neboli bázový proud je vždy nulový. Ovšem jeho vlastnosti se mírně liší vzhledem k jiným technologickým parametrům při výrobě.

V případě, že na vývody přivedeme malé napětí, má diak veliký odpor. Postupným zvyšováním napětí, dojde k překročení spínacího napětí U_{B0} (resp. U_{B01} při polaritě 1,2 a U_{B02} v případě polarity 2,1). V okamžiku překročení spínacího napětí dojde k lavinovému průrazu. Diak se otevře a jeho vnitřní odpor se sníží. Začne jím protékat proud I_{B0}. Důsledkem čehož na diaku poklesne napětí o ΔU (předpokládá se, že je diak sériově spojen s předřadným rezistorem). Pokud se zvyšuje proud, který protéká diakem, dochází ke zvyšování hodnoty ΔU.

U ideálního diaku by měly být charateristiky měřené pro dvě různé polarity stejné. Ve praxi se však liší. Je to dáno technologií výroby. Tento rozdíl ΔU_{B0} se vyjadřuje tzv. symetrií charakteristiky a je podle [1.] dán hodnotou

$$\Delta U_{B0} = |U_{B01} - U_{B02}| \tag{1}$$

K měření se využívá diak KR 105 od firmy Tesla. V [2.] jsou výrobcem uvedeny katalogové údaje: $U_{B0} = (26 \pm 4)$V, $I_{B0} < 1$mA, $\Delta U > 4$V při $I = 10$mA, $|U_{B01} - U_{B02}| < 5$V. Mezní výkon na diaku je $P = 300$mW

<u>Měření voltampérové charakteristiky diaku</u>

K měření voltampérové charakteristiky diaku se používá zapojení pro velké odpory (k sériové kombinaci diaku a ampérmetru je připojen voltmetr). Sériově s regulovatelným zdrojem napětí je zapojen ochranný rezistor (doporučená hodnota odporu rezistoru je $R > 3\text{k}\Omega$). Zdroj napětí spolu s ochranným rezistorem jsou připojeny paralelně k voltmetru.

Zvyšováním napětí na diaku se docílí jeho otevření. Dále se pomocí změn ochranného rezistoru či pomocí změn napětí zdroje, docílí různého proudu, který protéká diakem. Odečítá se napětí na diaku. Tento postup je zvolen z důvodů malých změn napětí v závislosti na proudu.

Relaxační kmity v obvodu s diakem

Diak lze použít jako spínací prvek pro generátory ralaxačních kmitů. Obvod je složen z R–C článku, který je připojen ke zdroji elektrického napětí. Ke kondenzátoru je paralelně připojen diak, osciloskop a čítač. Osciloskop a čítač slouží ke sledování frekvence relaxačních kmitů. Ke zdroji napětí je paralelně připojen voltmetr, který slouží k zjištění napajecího napětí.

Po zapnutí zdroje elektrického napětí U_0 dojde k nabíjení kondenzátoru s kapacitou C přes rezistor s odporem R. Časová závislost napětí U_C na kondenzátoru je dána vztahem:

$$U_C(t) = U_0 \left(1 - e^{\frac{t}{R \cdot C}}\right) \tag{2}$$

Pokud je U_0 větší, než spínací napětí diaku U_{B0}, dojde v čase t_1, kdy se $U_C = U_{B0}$, k sepnutí diaku. Odpor diaku klesne a kondenzátor se začne vybíjet po dobu t_2 přes diak. Jakmile napětí na kondenzátoru klesne na hodnotu U_{zh}, dojde k rozpojení diaku. Odpor diaku se opět zvýší o několik řádů. Dojde k opětovnému nabíjení kondenzátoru a děj se opakuje.

U ideálního diaku je odpor v sepnutém stavu nulový. To znamená, že při vybíjení se kondenzátor vybije na nulu. Ve zkutečnosti tomu tak není, a napětí na kondenzátoru se zmenší pouze na hodnotu U_{zh}. Pokud se velikost kapacity kondenzátoru zmenšuje, zmenšuje se i hodnotu U_{zh}. Časový průběh nabíjení kondezátoru je pak dán vztahem:

$$U - U_{zh} = (U_0 - U_{zh}) \left(1 - e^{\frac{t}{R \cdot C}}\right) \tag{3}$$

Pro případ okamžiku, kdy je přivedeno napětí, je hodnota $U_{zh} = 0$. Jedná se však o speciální případ, který se dále dá zanedbat, pokud se měření provádí v dostatečné době po připojení napětí.

Z rovnice (3) se dá odvodit vztah:

$$t_1 = RC \cdot \ln \left(\frac{U_0 - U_{zh}}{U_0 - U_{B0}} \right) \tag{4}$$

kde t_1 je doba nabíjení kondenzátoru. Doba vybíjení kondenzátoru $t_2 \ll t_1$.

Výsledky měření

Nejdříve jsem změřil spínací napětí U_{B01}, U_{B02} na obou polaritách.

U_{B01} [V]	32,8	32,9	32,9	32,8	32,8	32,7	32,7
U_{B02} [V]	32,4	32,4	32,2	32,2	32,3	32,3	

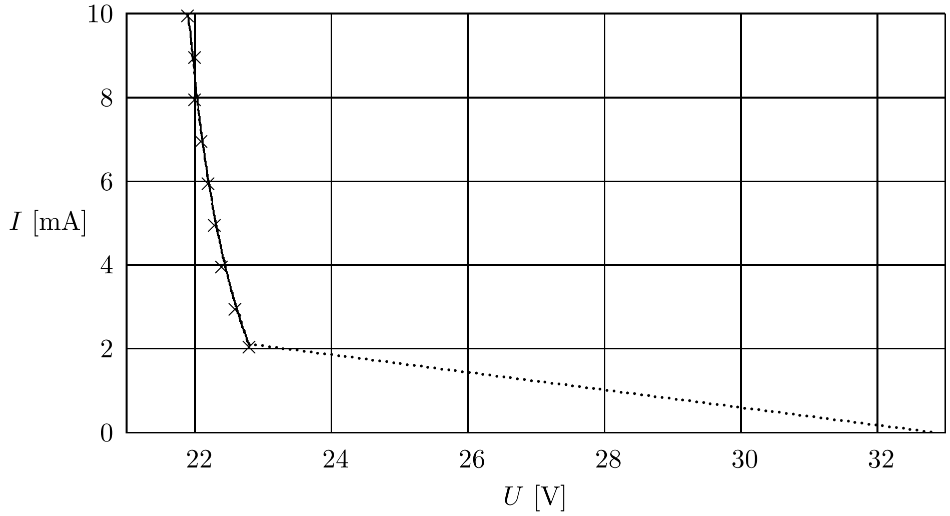
Tab 1.: Měření spínacích napětí při obou polaritách

Spínací napětí jsem určil jako $U_{B01} = (32,8 \pm 0,3)\,\mathrm{V}$ a $U_{B02} = (32,3 \pm 0,3)\,\mathrm{V}$.
Pomocí vzorce (1) jsem určil symetrii voltampérové charakteristiky: $\Delta U_{B0} = (0,5 \pm 0,6)\,\mathrm{V}$.
Dále jsem měřil voltampérovou charakteristiku diaku v obou polaritách.

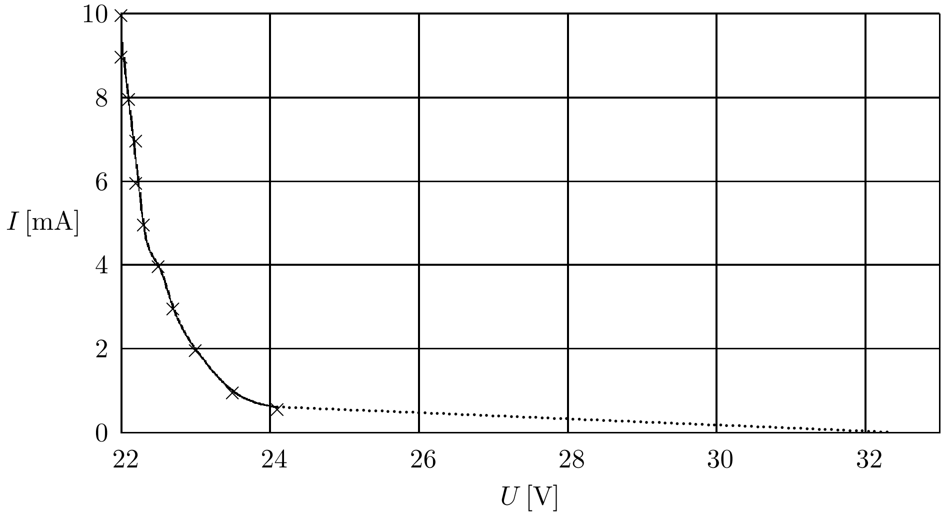
I [mA]	U [V]	U [V]
0,6		24,1
1,0		23,5
2,0		23,0
2,1	22,8	
3,0	22,6	22,7
4,0	22,4	22,5
5,0	22,3	22,3
6,0	22,2	22,2
7,0	22,1	22,2
8,0	22,0	22,1
9,0	22,0	22,0
10,0	21,9	22,0

Tab 2.: Voltampérová charakteristika

Graf 1.1.: Voltampérová charakteristika při polaritě 1,2



Graf 1.2.: Voltampérová charakteristika při polaritě 2,1



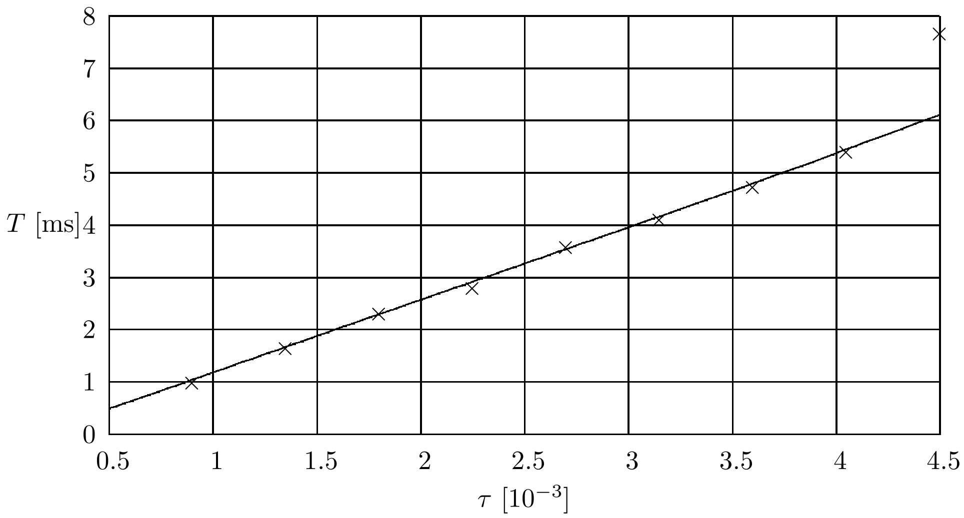
Z grafů 1.1 a 1.2 jsem odečetl $\Delta U_1 = (10,1 \pm 0,4)\,\mathrm{V}$ při polaritě 1,2 a $\Delta U_2 = (9,9 \pm 0,4)\,\mathrm{V}$ při polaritě 2,1. Tečkovanou čarou je naznačen neměřený úsek při otevření diaku.

Dále jsem měřil závislost periody T relaxačních kmitů na časové konstantě $\tau = R \cdot C$. Měřil jsem při stálem napájecím napětí $U_0 = 60\,\mathrm{V}$ a odporu rezistoru $R = 45\,\mathrm{k\Omega}$. Měnil jsem kapacitu kondenzátoru C v rozsahu 100 nF až 10 nF. Frekvenci jsem odečítal pomocí čítače a pro kontrolu a porovnání jsem odečítal také periodu na osciloskopu.

R [kΩ]	C [nF]	τ [10^{-3}]	f_{cit} [Hz]	T_{cit} [ms]	T_{osc} [ms]	U_{zh} [V]
45	100	4,50	130	7,69	6,2	19
45	90	4,05	184	5,43	5,1	18
45	80	3,60	210	4,76	4,67	19
45	70	3,15	242	4,13	3,8	19
45	60	2,70	277	3,61	3,1	18
45	50	2,25	355	2,82	2,92	19
45	40	1,80	428	2,34	2,24	19
45	30	1,35	597	1,68	1,58	18
45	20	0,90	986	1,01	1,01	19
45	10	0,45	2370	0,42	0,40	19

Tab 3.: Závislost periody signálu na τ

Graf 2.: Závislost periody signálu na τ



Dále jsem vyzkoušel metodu zjišťování frekvence pomocí Lissajousových obrazců. Na jeden ze vstupů osciloskopu s vypnutou časovou základnou jsem přivedl signál z oscilátoru tvořeného rezistorem, kondenzátorem, diakem a zdrojem elektrického prudu. Na druhý vstup jsem přivedl signál z generátoru. Pokud je frekvence signálu z generátoru shodná s frekvencí oscilátoru (nebo jejím racionálním násobkem) objeví se na osciloskopu příslušné Lissajousovy obrazce.

Údaje jsem zároveň měřil na čítači pro jejich porovnání.

R [kΩ]	C [nF]	f_{cit} [Hz]	f_{gen} [Hz]
45	1000	36,6	41
45	100	342	340
45	10	$6,4 \cdot 10^3$	$6,8 \cdot 10^3$
5	100	$4,7 \cdot 10^3$	$5,2 \cdot 10^3$
5	10	$58,9 \cdot 10^3$	$62 \cdot 10^3$

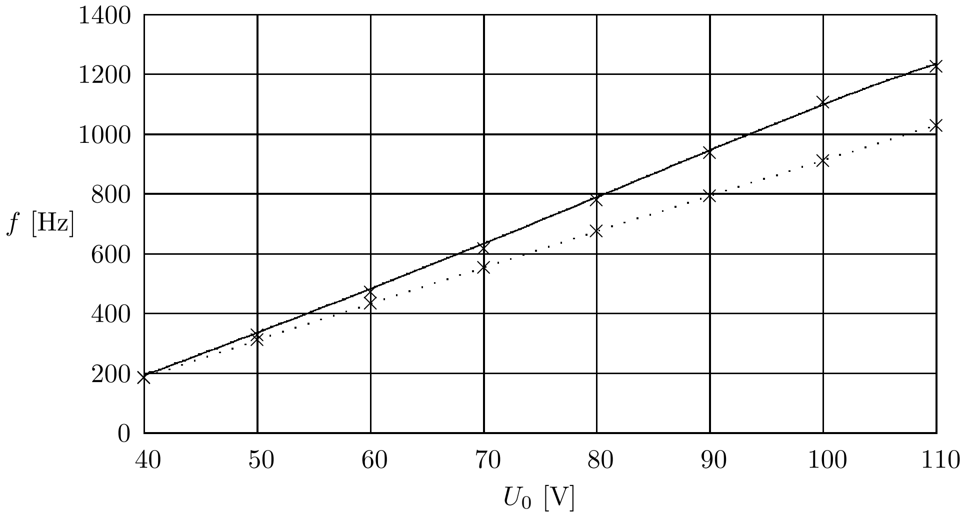
Tab 4.: Porovnání naměřené frekvence pomocí čítače a pomocí Lissajousových obrazců

Závislost frekvence f_{cit} na napětí zdroje U_0 jsem měřil pro napětí v rozsahu 40 až 110 V při kostantní velikosti kapacity kondenzátoru $C = 330\,\text{nF}$ a odporu rezistoru $R = 13\,\text{k}\Omega$. Naměřené hodnoty jsem porovnal s vypočtenými hodnotami T_{teor} pomocí vztahu (4). Odtud jsem určil teoretickou frekvenci f_{teor} jako převrácenou hodnotu T_{teor}

U_0 [V]	f_{cit} [Hz]	U_{zh} [V]	T_{teor} [ms]	f_{teor} [Hz]
40	192,2	10,2	5,38	185,86
50	335,1	10,2	3,20	312,06
60	478,9	10,4	2,30	434,74
70	626,0	10,4	1,81	553,43
80	788,1	10,6	1,48	676,26
90	946,5	10,6	1,26	794,54
100	1114,9	10,6	1,10	912,51
110	1234,9	10,6	0,97	1030,28

Tab 5.: Závislost frekvence na velikosti napájecího napětí

Graf 3.: Závislost frekvence kmitání na napájecím napětí



Naměřená charakteristika je znázorněna plnou čarou. Vypočtená hodnota je znázorněna tečkovanou čarou.

Diskuse výsledků

Při měření spínacího napětí jsem používal voltmetr, který umí zaznamenávat nejvyšší naměřenou hodnotu. Tento voltmetr pracuje s jistou vzorkovací frekvencí. To znamená, že pouze v určitých časech měří napětí. Chybu měření danou voltmetrem proto odhaduji na $s = \pm 0,3$ V. Statistická chyba byla menší než $\pm 0,01$ V.

Naměřená hodnota spínacího napětí $U_{B01} = (32,8 \pm 0,3)$ V a $U_{B02} = (32,3 \pm 0,3)$ V. Tyto hodnoty se schodují v rámci chyby měření s katalogovým údajem $U_{B0} = (26 \pm 4)$V. Za zmínku stojí, že měřený diak se více shoduje s typem KR 106, který má v katalogu uvedeno $U_{B0} = (32 \pm 4)$V.

Symetrie voltampérové charakteristiky $\Delta U_{B0} = (0,5 \pm 0,6)$ V se také shoduje s katalogovým údajem $\Delta U_{B0} < 5$ V. Vysoká chyba měření u tohoto parametru je dána sčítáním hodnot s již tak dost vysokou chybou.

Pokles napětí ΔU je v katalogu uváděn > 4 V. Naměřil jsem hodnotu $\Delta U_1 = (10,1 \pm 0,4)$ V při polaritě 1,2 a $\Delta U_2 = (9,9 \pm 0,4)$ V při polaritě 2,1. Při měření voltmetrem bez funkce paměti nejvyšší naměřené hodnoty, jsem odhadl chybu měření jako $s = \pm 0,1\,\mathrm{V}$.

Při měření relaxačních kmitů byla doba vybíjení kondenzátoru t_2 zanedbatelná s dobou nabíjení t_1, jak jsem mohl ověřit na osciloskopu. Měření periody relaxačních kmitů pomocí čítače je přesnější. Je to dáno tím, že čitač provede několik měření a zobrazovaný údaj je střední hodnotou naměřených údajů. Chybu se kterou měří čítač odhaduji na 1%. Nejedná se však o konečnou chybu měření (viz. dále). U měření s osciloskopem je chyba větší, neboť hodnoty se odečítají z mřížky na obrazovce osciloskopu. Ta znamená méně jemný rozsah a také vyšší pravděpodobnost hrubé chyby. Přesnost měření osciloskopem odhaduji na 10%.

Nezanedbatelný vliv na oscilační obvod má také teplota. Během průchodu proudu diakem dochází k úbytku napětí. Vzniká tak tzv. ztrátový výkon. Elektrická energie se přemění v tepelnou a tím se zvýší teplota pouzdra a polovodičové části diaku. Vlastnosti diaku jsou závislé na teplotě, proto při měření periody docházelo k k její změně, která se pohybovala v rozmezí 2%.

Periodu signálu oscilátoru jsem měřil také pomocí Lissajousových obrazců. Tato metoda je nejméně přesná. Vyšší chyba měření je způsobena vyšším počtem použitých přístrojů, ale předně počtem dílků logaritmické stupnice referenčního generátoru. Chybu měření touto metodou odhaduji na 15%.

Posledním provedeným měřením bylo zjištění závislosti frekvence signálu na velikosti napájecího napětí. Největší chyba měření 19,9% byla při největším napájecím napětí 110 V. Je to dáno tím, že chyby měření napájecího napětí vystupují v logaritmu. Celkovou chybu měření jsem odhadl na 20%. Chybu také ovlivňuje fakt, že při vyšších U_0 se více projeví zanedbávaná perioda t_2.

Závěr

Naměřené hodnoty diaku KR 105 se shodují v rámci chyb měření s katalogovými údaji [2.]. Naměřená voltampérová charakteristika je pro různé polarity znázorněna v grafech 1.1 a 1.2.

Sestavil jsem oscilační obvod z rezistoru, kondenzátoru a diaku. Potvrdila se očekávaná závislost τ a na velikosti napájecího napětí. Průběhy odpovídaly teoretickému vztahu v rámci chyby měření.

Periodu (resp. frekvenci) relaxačních kmitů jsem proměřil pomocí čítače, osciloskopu a Lissajousových obrazců. Nejpřesnější bylo měření pomocí čítače.

Seznam použité literatury

[1.] *Studijní materiály na stránkách fyzikálního praktika.* Úloha 14, Praktikum II.
http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/214.htm
[2.] *Katalog TESLA*, 1985, str. 228.